



Une nouvelle méthode de recyclage des silicones développée au laboratoire CP2M à Lyon !

Publié le 25 avril 2025 dans la revue **Science, des scientifiques du laboratoire CP2M dévoilent un procédé inédit de recyclage des silicones. Cette découverte marque une étape clé vers une diminution notable de l'empreinte environnementale de la filière. Zoom sur ce laboratoire de pointe et sur cette étude de cas riche en promesses.**

Le virage « vert » du CP2M

Fondé en 1993 à la suite de la fusion de deux écoles lyonnaises de chimie, le CP2M (Catalyse, Polymérisation, Procédés, Matériaux) est une composante historique de l'École supérieure de chimie, physique, électronique de Lyon (CPE Lyon). Ce laboratoire se distingue par sa maîtrise complète de la chaîne de développement, depuis la conception et la synthèse des catalyseurs jusqu'à la polymérisation, en passant par l'optimisation des procédés et l'analyse des propriétés des matériaux finaux.

Au fil des années, les activités de recherche du CP2M ont largement évolué pour s'adapter aux enjeux scientifiques et sociétaux actuels.

→ Activités historiques et actuelles

Historiquement centré sur la polymérisation catalytique des oléfines et la polymérisation radicalaire des monomères vinyliques, le laboratoire a progressivement étendu ses recherches aux silicones, en collaboration étroite avec Elkem Silicones, ainsi qu'aux polymères issus de la polycondensation/polyaddition, utilisés dans des applications de haute technicité comme l'aéronautique, en partenariat avec Arkema et Solvay (désormais Syensqo).

→ Virage stratégique

Depuis une dizaine d'années, le CP2M a amorcé un virage stratégique vers le recyclage des polymères. Le laboratoire mise sur le recyclage chimique catalytique, une approche qui consiste à déconstruire les chaînes polymères pour retrouver les monomères ou oligomères de base, dans le but de régénérer des matériaux présentant une qualité équivalente à celle du neuf.

En parallèle, des équipes étudient les microplastiques en synthétisant des modèles de plastiques dont la taille et la composition sont précisément contrôlées. Ces échantillons servent de support à des collaborations avec des biologistes et toxicologues, qui peuvent ainsi analyser leurs effets sur la santé humaine et animale.

→ Éco-conception et ACV

Au-delà du traitement des déchets, la recherche menée au CP2M s'oriente de plus en plus vers une approche d'éco-conception, visant à concevoir des polymères pensés dès le départ pour être durables ou être recyclés par exemple. Cette démarche intègre la vie du

matériau dans sa totalité - sa fabrication, son utilisation et sa fin de vie - et ce dès sa conception, influençant directement les choix de synthèse et de procédés. Pour y parvenir, plusieurs leviers complémentaires sont explorés, tels que le recours à la biomasse, le recyclage, la capture du carbone, la minimisation de l'énergie nécessaire mise en jeu lors du cycle de vie du matériau (synthèse/mise en forme, fonctionnement/utilisation, gestion des déchets) et la réduction de la dépendance aux ressources fossiles comme le pétrole.

Dans ce contexte, l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) s'impose comme un outil stratégique essentiel, à mobiliser dès les premières étapes de chaque projet.

Un projet pour repenser le cycle de vie des silicones

L'un des projets menés par l'équipe PCM (Polymérisation, Catalyse, Matériaux) du CP2M est dédié au recyclage chimique des silicones. À la tête de ce projet, deux chercheurs aux parcours riches et complémentaires.

Vincent Monteil, ingénieur chimiste diplômé de CPE Lyon, a consacré sa thèse à l'étude des polymères pour pneumatiques en collaboration avec Michelin. Ces travaux l'ont conduit à se spécialiser dans l'utilisation de la catalyse pour la synthèse de polymères. Recruté par le CNRS en 2005, il a progressivement orienté ses recherches de la synthèse vers le recyclage et l'évaluation de l'impact environnemental des matériaux polymères.

Jean Raynaud, ingénieur en industries chimiques et procédés, a quant à lui effectué son doctorat à Bordeaux sur la catalyse appliquée à la polymérisation. Après un post-doctorat aux États-Unis, il rejoint le CNRS en 2013. Ses travaux portent sur la fabrication éco-efficente de polymères grâce à la catalyse, visant à réduire la consommation d'énergie. Plus récemment, il concentre ses recherches sur la déconstruction des polymères, afin d'en récupérer les atomes et de les réintégrer dans de nouveaux cycles de production.

Le projet qu'ils codirigent est soutenu dans le cadre d'un PSPC (Projet Structurant Pour la Compétitivité), et réunit notamment en plus du CP2M deux partenaires industriels : Elkem Silicones, leader du secteur et partenaire historique du laboratoire, et Activation, entreprise experte en mise à l'échelle de procédés chimiques.

La précision d'un « ciseau moléculaire »

Les silicones se distinguent des autres polymères par leur origine et leur structure. Alors que la plupart des matériaux polymères proviennent du pétrole, les silicones sont issus du quartz, transformé successivement en silicium métal puis en chlorosilanes (éléments précurseurs du silicone). Leur squelette moléculaire est formé d'une chaîne inorganique d'atomes de silicium et d'oxygène, et non de carbone et d'hydrogène. Seuls les groupements organiques portés par le Si peuvent



Vincent Monteil CP2M Lab



Jean Raynaud CP2M Lab

provenir du pétrole : les groupements méthyles viennent du méthanol souvent pétrosourcé par exemple, mais celui-ci peut également être biosourcé.

L'enjeu du recyclage des silicones réside dans la valorisation de l'atome de silicium et la prévention de sa dispersion dans l'environnement. Le projet de l'équipe PCM s'est concentré sur le recyclage chimique, et particulièrement sur le développement de boucles de recyclage à faible consommation d'énergie. La catalyse est au cœur de l'innovation, offrant des voies réactionnelles alternatives qui réduisent la barrière énergétique des transformations chimiques.

Le procédé original mis au point s'appuie ainsi sur un catalyseur surnommé le « ciseau moléculaire », capable de couper avec une haute précision les liaisons du polymère. Ce système fonctionne grâce à l'association de deux composants : une source de chlore – le trichlorure de bore – et un catalyseur à base de gallium – le trichlorure de gallium. Ce dernier interagit spécifiquement avec un atome d'oxygène du squelette silicone, fragilisant la liaison silicium-oxygène-silicium et facilitant le transfert du chlore vers le silicium, ce qui entraîne une rupture maîtrisée de la chaîne du polymère.

La robustesse du catalyseur est un atout majeur du procédé. Il reste efficace même en présence d'additifs, de colorants ou de charges minérales contenus dans les déchets silicones commerciaux. Cette stabilité permet une récupération quasi-totale des composants : les charges solides sont séparées, le chlorosilane liquide et volatil est purifié par distillation, et le catalyseur au gallium est récupéré par extraction liquide avant d'être réutilisé. Ce fonctionnement rend le procédé à la fois économiquement viable et respectueux de l'environnement.

Du laboratoire à l'échelle pilote

Pour décrypter en détail le fonctionnement du « ciseau moléculaire », l'équipe PCM s'appuie sur la Résonance Magnétique Nucléaire (RMN), une technique qui permet de suivre directement les atomes impliqués dans la réaction, en particulier le silicium et le gallium. Ce travail expérimental est combiné à des approches de modélisation moléculaire,

utilisées pour simuler les interactions et confirmer les mécanismes réactionnels envisagés.

En théorie, la récupération et la purification du silicium permettent de boucler le cycle indéfiniment, sans altérer les propriétés du matériau régénéré. Pour confirmer cette hypothèse, il est essentiel de caractériser le polymère recyclé. Au CP2M, deux techniques majeures sont mobilisées :

1) La Chromatographie d'Exclusion Stérique (CES) permet de mesurer la masse molaire et la distribution des longueurs de chaînes polymères. En séparant les macromolécules selon leur taille, cette méthode révèle si le catalyseur a généré des chaînes courtes ou longues, influençant directement les propriétés finales du matériau.

2) La Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC) analyse le comportement thermique des polymères, notamment les températures de transition vitreuse, de fusion et de cristallisation. Grâce à un partenariat solide avec le fabricant Mettler Toledo, le laboratoire dispose d'instruments de pointe capables d'examiner des échantillons de l'ordre du microgramme, avec des vitesses de chauffage et refroidissement rapides.

Une fois le procédé maîtrisé et validé au laboratoire, l'étape suivante consiste à en démontrer la faisabilité à une échelle pré-industrielle. Dans cette optique, la collaboration entre le CP2M et la société Activation permet de passer de quantités de l'ordre du gramme à plusieurs kilogrammes de silicones recyclés.

Pour conclure, le succès de ce projet de recyclage des silicones repose sur sa capacité à faire évoluer la filière d'un modèle linéaire à une véritable économie circulaire, un pas décisif vers une chimie plus durable !

Pour en savoir plus :

Laboratoire CP2M

Vincent MONTEIL

Vincent.MONTEIL@univ-lyon1.fr

Jean RAYNAUD

jean.raynaud@cnrs.fr

www.cp2m.org/